

FENÓMENOS DE SEDIMENTAÇÃO E TRANSPORTE - INÍCIO DO MOVIMENTO Sedimentation and Transport Phenomena - Beginning of Sediment Motion

ELSA CARVALHO ⁽¹⁾, RODRIGO MAIA ⁽²⁾ & MARIA FERNANDA PROENÇA ⁽³⁾

⁽¹⁾ Estudante de Doutoramento, FEUP,
Rua Dr. Roberto Frias s/n, 4200-465 Porto, elsac@fe.up.pt

⁽²⁾ Professor Associado, FEUP,
Rua Dr. Roberto Frias s/n, 4200-465 Porto, rmaia@fe.up.pt

⁽³⁾ Professor auxiliar, FEUP,
Rua do Dr. Roberto Frias s/n, 4200-465 Porto, fproenca@fe.up.pt

Resumo

Este trabalho constitui um elo de ligação entre os estudos de camada limite realizados anteriormente (leitos lisos ou ligeiramente rugosos) e o estudo do início do movimento a desenvolver e aprofundar (leitos granulares). Utilizando os resultados obtidos para as diferentes condições de escoamento e para superfícies lisas, estimou-se, por aplicação de critérios existentes, a possibilidade teórica de ocorrência do início de movimento em leitos de partículas uniformes, regularmente dispostas. Os resultados obtidos foram comprovados através de ensaios experimentais, considerando as mesmas condições de escoamento. Foram ainda realizados ensaios complementares, considerando condições de escoamento para as quais se verificou o movimento de partículas do leito. Destes ensaios, ainda em fase inicial, apresentam-se alguns resultados, que serão desenvolvidos em trabalhos futuros.

Palavras-chave: Início do Movimento, Shields, Hjulstrom, Leitos Sedimentares.

Abstract

The present work is a link between the previously made boundary layer's studies and the future deep study of the beginning of sediment motion. Using the obtained results for smooth walls, the possibility of occurrence of sediment motion has been evaluated by means of known criteria, for uniform particle beds and for the same flow conditions. Those results have been confirmed through experimental measurements, carried out under the same flow conditions. Additional tests using particle motion flow conditions have been made and some results are also presented and will be developed in a future work.

Keywords: Beginning of Sediment Motion, Shields, Hjulstrom, Sediment Beds.

1. Introdução Teórica

O movimento dos sedimentos num curso de água constitui um fenómeno complexo. O presente estudo, inserido no desenvolvimento dos trabalhos referentes à Tese de Doutoramento “Fenómenos de Sedimentação e Transporte – Novas Perspectivas de Análise”, constitui uma transição entre os estudos de camada limite realizados anteriormente, em leito liso e rugoso tipo “lixa”, e o estudo do início do movimento das partículas, considerando um leito artificial simplificado, com partículas uniformes e distribuição regular.

As partículas esféricas podem ter um arranjo quadrangular, triangular ou misto, Figura 1. No presente estudo optou-se por um arranjo triangular.

Existem diferentes formas para caracterizar o início do movimento de sedimentos, entre as quais a de Kramer (1935), referida em Aleixo (2006), que distingue três tipos de movimento:

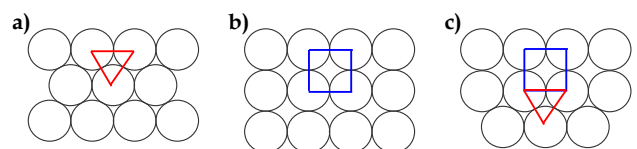


Figura 1. Arranjo das partículas: a) triangular; b) quadrangular; c) misto.

- Movimento fraco de poucos sedimentos;
- Movimento mediano de numerosos sedimentos, de tal forma que não é possível contá-los;
- Movimento generalizado de sedimentos de diferentes dimensões, em todo o domínio, em qualquer instante do tempo.

Dada a dificuldade de definir com exactidão as condições limite do início de movimento, julga-se necessário adoptar um critério o mais objectivo possível.

Considera-se, neste estudo, que o início do movimento ocorre quando, para uma determinada condição de escoamento, pelo menos uma partícula abandona a sua posição inicial no leito.

O estudo do início do movimento realizado pode ser dividido em duas partes: estudo preliminar por aplicação dos critérios (teóricos) existentes e verificação experimental.

De facto, a metodologia seguida e resumida neste trabalho foi:

- Escolha de critérios teóricos de início de movimento;
- Escolha da gama de diâmetros de partículas (esféricas) constituintes do fundo a ensaiar;
- Verificação, para a gama de escoamentos ensaiados anteriormente (fundos lisos do tipo “lixa”), da possibilidade teórica da ocorrência de início de movimento desses fundos;
- Adequação das condições e gamas de escoamento a ensaiar para caracterização das condições de início de movimento em fundos granulares, a desenvolver e a completar em fase posterior do desenvolvimento da investigação conduzida.

2. Critérios do Início de Movimento

2.1. Introdução

Os principais critérios existentes para estabelecer as condições de início do movimento, designadas como condições críticas, podem ser agrupados em dois grandes grupos, de acordo com os princípios em que se baseiam: critérios de velocidade média crítica (baseados na velocidade média do escoamento) e critérios de tensão crítica (baseados na tensão de arrastamento no fundo).

De cada um dos grupos seleccionou-se um critério representativo: o critério de Hjulstrom (critério de velocidade média crítica) e o critério de Shields (critério de tensão crítica).

2.2. Critério de Hjulstrom

O critério de Hjulstrom é um dos critérios baseados na velocidade média crítica (Cardoso, 1998), definido para grãos uniformes (areia).

O diagrama da Figura 2 delimita três zonas distintas em função do diâmetro dos sedimentos, d , de acordo com o tipo de fenómeno: sedimentação, transporte e erosão.

Considerando, por exemplo, partículas de 1mm de diâmetro, verifica-se que, de acordo com o diagrama de Hjulstrom, nos escoamentos com velocidade média do escoamento inferior a 7 cm/s, ocorrerá sedimentação.

Se a o valor da velocidade se situar entre 7 cm/s e 30 cm/s, os sedimentos serão transportados na corrente do escoamento, enquanto que para velocidades superiores haverá movimento dos sedimentos do próprio leito, ou seja, erosão.

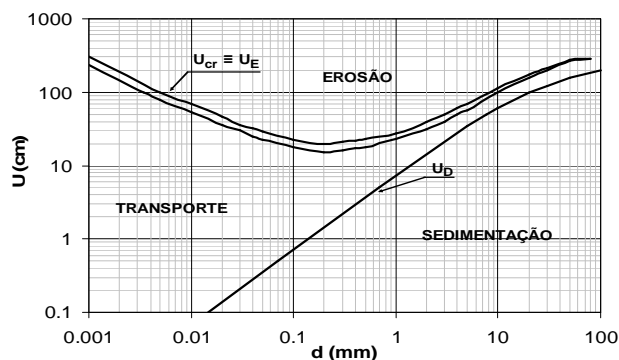


Figura 2. Diagrama de Hjulstrom (Graf, 2001).

2.3. Critério de Shields

De acordo com o critério de Shields, um dos critérios baseados na tensão crítica de arrastamento, as principais variáveis de que depende o início do movimento podem ser agrupadas em dois parâmetros adimensionais inter-relacionáveis: o parâmetro de Shields, Y_{cr} , equação [1], e o número de Reynolds de atrito, X_{cr} , equação [2] (Cardoso, 1998):

$$Y_{cr} = \frac{u_{*c}^2}{(s-1)gd}, \quad [1]$$

em que $u_{*c} = \sqrt{\tau_c / \rho}$ representa a velocidade de atrito crítica, sendo τ_c a tensão de arrastamento crítica, $s = \rho_s / \rho$, em que ρ_s representa a massa volúmica dos sedimentos, ρ a massa volúmica da água, g a aceleração da gravidade, d o diâmetro característico dos sedimentos e X_{cr} o número de Reynolds de atrito, dado pela expressão,

$$X_{cr} = \frac{u_{*c}d}{\nu}, \quad [2]$$

em que ν representa a viscosidade cinemática.

De acordo com este critério, o início do movimento é, caracterizável pela função $Y_{cr} = f(X_{cr})$, que corresponde às condições críticas do início do movimento e é traduzida graficamente pela curva apresentada no diagrama de Shields, Figura 3.

Os pontos localizados acima desta curva correspondem a condições de escoamentos em que há movimento das partículas do leito, enquanto que os pontos localizados abaixo da curva correspondem a escoamentos em que não se verifica movimento das partículas do leito.

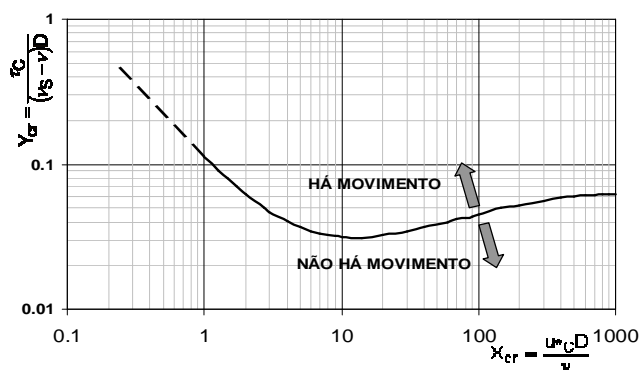


Figura 3. Diagrama de Shields.

A aplicação do critério de Shields implica a determinação da tensão de arrastamento para as condições críticas do escoamento.

A tensão de arrastamento na parede, τ , é, por definição, proporcional ao gradiente de velocidades na parede e dada pela expressão:

$$\tau = \mu \left. \frac{\partial u}{\partial y} \right|_{\text{parede}}, \quad [3]$$

em que μ representa o coeficiente de viscosidade dinâmica, u a velocidade média pontual e y a correspondente distância à parede.

Dado que o gradiente de velocidade nem sempre é fácil de determinar, na investigação já desenvolvida foram utilizados métodos indirectos para a determinação da tensão de arrastamento, baseados no conhecimento do perfil de velocidades e no ajuste de diferentes leis a diferentes zonas desse mesmo perfil.

Estas leis são função da tensão de arrastamento e possibilitam, assim, a determinação desta grandeza, ainda que de forma indirecta (Carvalho *et al.*, 2006).

3. Instalação Experimental

Os resultados experimentais foram obtidos no canal metálico do Laboratório de Hidráulica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Figura 4, que tem 40 cm de largura, 60 cm de altura e 17 m de comprimento. A inclinação, que pode ser regulada, foi considerada nula.

O caudal é controlado por uma válvula existente a montante do canal e a comporta existente na secção da extremidade jusante permite variar a altura do escoamento.

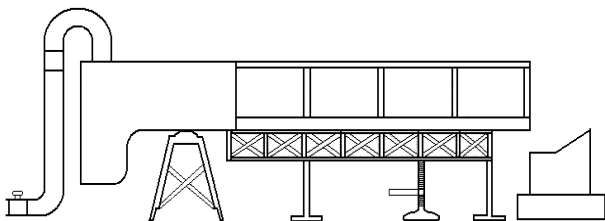


Figura 4. Esquema do canal metálico.

Na zona de ensaio do canal, está colocada uma placa horizontal, de modo a permitir atenuar os efeitos das irregularidades do fundo, acelerar o desenvolvimento do escoamento e facilitar a utilização de diferentes tipos de fundos, por substituição da placa.

A placa de perspex tem cerca de 1.5 m de comprimento e o topo situa-se 8 cm acima do fundo do canal, não se verificando escoamento sob a placa, Figura 5.

O suporte da placa de ensaio é realizado por meio de duas barras longitudinais, recorrendo-se para a sua fixação a um parafuso que liga a placa ao revestimento do fundo do canal (em perspex). Imediatamente a montante da placa encontra-se uma rampa, com cerca de 20 cm de comprimento, que permite a convergência do escoamento sobre a placa.

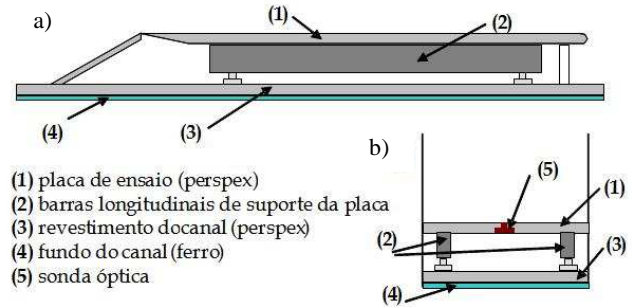


Figura 5. Esquema de instalação da placa horizontal: a) corte longitudinal, b) corte transversal (secção de estudo).

O regime de escoamento é turbulento rugoso quando o número de Reynolds de atrito, Re^* , equação [4], é superior a 70 (Graf, 2001), ou seja,

$$Re^* = \frac{u^* d}{\nu} > 70, \quad [4]$$

em que u^* representa a velocidade de atrito e d o diâmetro dos sedimentos.

Com base em estudos preliminares realizados sobre leitos lisos e rugosos, tipo “lixa” (com uma rugosidade média, k , de 0.262 mm), foi possível verificar que, para a gama de velocidades de atrito obtida nesses estudos (apresentados em 4., Quadros 1 e 2), o diâmetro das partículas teria que se situar entre 2.5 e 6 mm, para que o regime de escoamento fosse turbulento rugoso ($Re^* > 70$). Por este motivo, e tendo em conta os materiais disponíveis em laboratório, os estudos de início de movimento foram previstos ser realizados com leitos de esferas de vidro com 2 mm e 4 mm de diâmetro, dispostas com um arranjo triangular, Figura 6.



Figura 6. Arranjo do leito de esferas de vidro ($d=4$ mm).

Para facilitar os estudos realizados, nomeadamente o controlo do movimento das partículas, limitou-se o estudo à zona central da placa, com 40 cm de largura e cerca de 12 cm de comprimento, na qual as partículas estão soltas. Na área restante da placa, as partículas do leito encontram-se fixas, Figura 7.

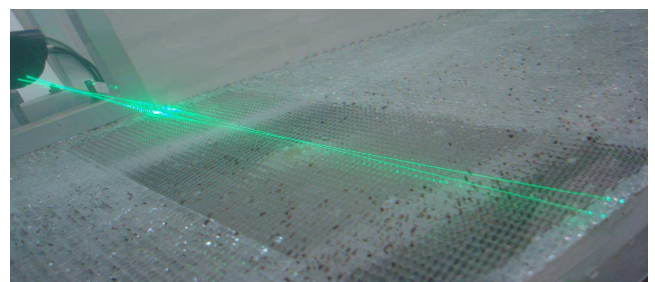


Figura 7. Leito de partículas uniformes - zona em estudo.

4. Avaliação da Possibilidade Teórica da Ocorrência do Início de Movimento.

4.1. Introdução

O presente estudo, baseado nos trabalhos realizados anteriormente, constitui uma análise preliminar do início do movimento, que possibilitará o desenvolvimento futuro desta temática. Assim, e uma vez que a aplicação dos critérios existentes implica o conhecimento da velocidade média do escoamento, da velocidade de atrito e/ou da tensão de arrastamento, optou-se por utilizar, como primeira estimativa, os respectivos valores medidos anteriormente para uma superfície lisa e rugosa tipo “lixa”, Quadro 1 e 2. Os estudos de caracterização da camada limite correspondentes foram realizados para diferentes condições de escoamento, nomeadamente caudal, Q , altura da comporta de jusante, h_p , e número de Reynolds, Re , definido por:

$$Re = \frac{U_{med} R}{\nu}, \quad [5]$$

em que U_{med} representa a velocidade média seccional do escoamento, ν a viscosidade cinemática da água e R o raio hidráulico, definido por:

$$R = \frac{S}{P}, \quad [6]$$

sendo S a secção do escoamento e P o perímetro molhado.

Para cada uma dessas condições foram obtidos os valores da velocidade média e da tensão de arrastamento, a partir dos perfis de velocidade com base nas medições efectuadas por anemometria laser por efeito Doppler. Nos quadros 1 e 2 apresentam-se as diferentes condições testadas, para as duas superfícies consideradas.

Quadro 1. Condições de escoamento consideradas: leito liso.

Ensaio	Q (L/s)	h (cm)	U (cm/s)	u* (m/s)	τ (N/m ²)
Q5hp10	5	5.6	22.32	0.0123	0.151
Q7.5hp10	7.5	6	31.25	0.0169	0.285
Q12hp12	12	10	30.00	0.0154	0.237
Q15hp10	15	8.9	42.13	0.0214	0.457
Q20hp15	20	15.6	32.05	0.0157	0.248
Q20hp10	20	10.3	48.54	0.0239	0.572
Q30hp15	30	17.9	41.90	0.0197	0.389
Q40hp12.5	40	16.4	59.45	0.0273	0.746

Quadro 2. Condições de escoamento consideradas: leito rugoso do tipo “lixa”.

Ensaio	Q (L/s)	h (cm)	U (cm/s)	u* (m/s)	τ (N/m ²)
Q5hp10	5	5.6	22.32	0.0113	0.127
Q7.5hp10	7.5	6	31.25	0.0146	0.213
Q12hp12	12	10	30.00	0.0157	0.247
Q15hp10	15	8.9	42.13	0.0218	0.473
Q20hp15	20	15.6	32.05	0.0165	0.272
Q20hp10	20	10.3	48.54	0.0241	0.581
Q30hp15	30	17.9	41.90	0.0188	0.352
Q40hp12.5	40	16.4	59.45	0.0266	0.704

A nomenclatura usada para a identificação dos ensaios, Q30hp10 (por exemplo) significa que o caudal imposto, Q , foi de 30 L/s e a altura da comporta de jusante, h_p , foi de 10 cm.

A análise dos valores dos quadros anteriores permite verificar que, com excepção de duas das condições apresentadas, os valores obtidos para o leito liso e do tipo “lixa” apresentam diferenças inferiores a 5%.

Por este motivo, e por se tratar de um estudo preliminar, decidiu-se utilizar os resultados obtidos para superfície lisa nas considerações seguidamente apresentadas.

4.2. Critério de Hjulstrom

Tendo em consideração os valores obtidos para as condições de escoamento apresentados anteriormente, foi possível aplicar o critério de Hjulstrom para os dois diâmetros considerados, 2 e 4 mm, Figura 8.

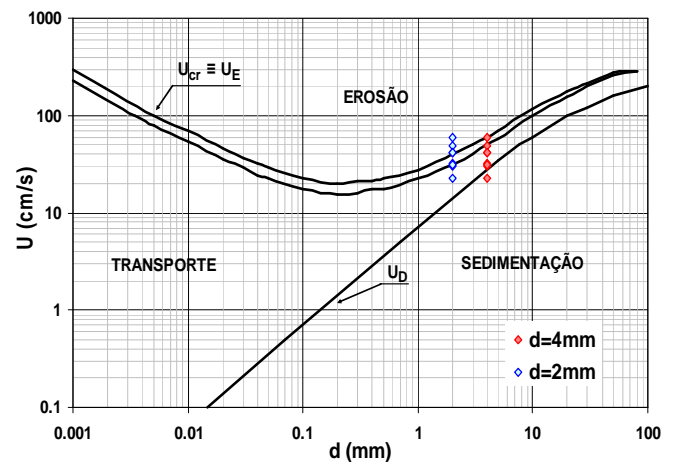


Figura 8. Aplicação do Critério de Hjulstrom.

A análise do gráfico da figura 8 permite verificar que, de acordo com este critério, para as condições ensaiadas e para um diâmetro de 4 mm, não deverá ocorrer qualquer movimento generalizado das partículas, registando-se apenas duas possíveis condições críticas, Q20hp10 e Q40hp12.5, cujos pontos representativos se encontram na linha limite do domínio da erosão, ou seja, quando se inicia o movimento das partículas do leito.

Em contraponto, para o diâmetro inferior de 2 mm, apenas um dos pontos representativos das condições se situa claramente abaixo do limite da zona de movimento (erosão), para uma velocidade de cerca de 20 cm/s.

As restantes condições correspondem, de acordo com este critério, a condições críticas ou de claro movimento de partículas.

4.3. Critério de Shields

De acordo com o critério de Shields, tal como foi já referido, as principais variáveis de que depende o início do movimento podem ser agrupadas no parâmetro de Shields, Y_{cr} , e no número de Reynolds de atrito, X_{cr} . No quadro 3 encontram-se os valores destes parâmetros (determinados pelas expressões [1] e [2]), obtidos para as diferentes condições de escoamento consideradas, Quadro 1, para os dois diâmetros.

Quadro 3. Parâmetros do critério de Shields.

Ensaio	d=4mm		d=2mm	
	X _{cr}	Y _{cr}	X _{cr}	Y _{cr}
Q5hp10	49.5	0.0023	24.7	0.0047
Q7.5hp10	62.9	0.0044	31.5	0.0088
Q12hp12	60.7	0.0037	30.4	0.0073
Q15hp10	79.6	0.0071	39.8	0.0141
Q20hp15	62.8	0.0038	31.4	0.0076
Q20hp10	96.3	0.0088	48.1	0.0177
Q30hp15	77.6	0.0060	38.8	0.0120
Q40hp12.5	101.8	0.0115	50.9	0.0231

A partir dos valores do quadro anterior, é possível localizar os diferentes pontos representativos no diagrama de Shields, para os 2 diâmetros considerados, Figura 9. No mesmo gráfico encontram-se ainda representadas as linhas referentes a diferentes condições de movimento de acordo com a seguinte classificação (Hoffmans *et al.*, 1997):

1. Movimento ocasional em algumas zonas;
2. Movimento frequente em algumas zonas;
3. Movimento frequente em muitas zonas;
4. Movimento frequente em quase todas as zonas;
5. Movimento frequente em todas as zonas;
6. Movimento permanente em todas as zonas;
7. Transporte generalizado.

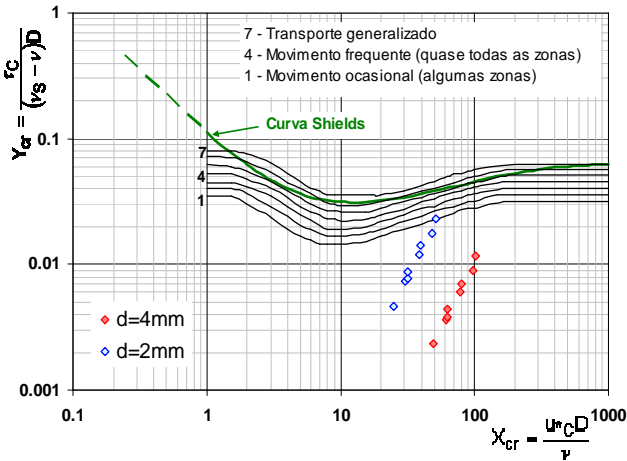


Figura 9. Aplicação do Critério de Shields.

De acordo com essa figura, verifica-se que a diminuição do diâmetro proporciona o aumento do parâmetro de Shields, Y_{cr} , e a diminuição do número de Reynolds de atrito, X_{cr} . Quadro 3, aumentando a possibilidade de ocorrência de movimento no caso das partículas de 2 mm.

A análise da figura anterior permite verificar que, de acordo com o critério de Shields, para as partículas de $d=4$ mm, para toda a gama de escoamentos anteriormente ensaiada, não deverá ocorrer movimento de partículas. Quanto às partículas de $d=2$ mm, só a condição mais desfavorável, correspondente a um caudal de 40 L/s, deverá ser condição crítica de início de movimento ocasional, em zonas localizadas do leito.

Mau grado essa indicação, é convicção dos autores que, neste último caso, quando e se tal ocorrer, ocasionará um movimento mais generalizado das restantes partículas do leito.

5. Verificação Experimental dos Resultados Obtidos Teoricamente

Os ensaios experimentais apresentados neste trabalho foram apenas realizados, nesta fase, para o diâmetro de 4 mm. Com estes ensaios pretende-se verificar os resultados da aplicação dos critérios teóricos de início de movimento existentes e, caso seja possível, determinar as condições críticas do escoamento, ou seja, as condições de escoamento para as quais, pelo menos uma das partículas do leito se destaca, iniciando o seu movimento no escoamento.

Para tal, e para cada uma das quatro condições de escoamento mais desfavoráveis, Q15hp10, Q20hp10, Q30hp15 e Q40hp12.5, foram realizados ensaios experimentais, de acordo com o seguinte procedimento:

- Fixar a altura da comporta de jusante;
- Variar progressivamente, em pequenos intervalos, o caudal;
- Para cada incremento de caudal verificar se ocorreram alterações no leito;
- Depois de atingida a condição de escoamento pretendida, esperar pelo menos 30 minutos para estabilização do escoamento;
- Verificar se para essa condição existiu movimento partículas do leito;

Para todas as condições ensaiadas não se verificou o início de movimento das partículas, de acordo com a definição considerada, ou seja, movimento de pelo menos uma partícula para uma condição de escoamento já estabilizada.

No entanto, por vezes, durante a fase de variação incremental do caudal, verificava-se que algumas partículas eram removidas do leito, mas tal ocorria devido à dificuldade em conseguir garantir incrementos pequenos de caudal. Para além das condições indicadas testou-se, ainda, uma condição limite de funcionamento do canal, considerando-se o caudal (máximo) de 60 L/s e uma altura do escoamento de cerca de 15 cm. Mesmo para esta condição limite verificou-se que não havia movimento de partículas.

Tendo em conta que para as condições testadas (nos limites de funcionamento do canal), não ocorreu movimento das partículas de 4 mm, considerou-se a hipótese de aumentar a velocidade do escoamento para, nas condições de funcionamento do canal e com a configuração de leito escolhida, se obter uma situação de início de movimento. As medições correspondentes a esta hipótese ainda se encontram em execução, pelo que se apresentam aqui apenas os primeiros resultados. Para tal procedeu-se à alteração da instalação experimental, colocando uma comporta na secção de início da placa, o que permite reduzir as alturas do escoamento e consequentemente aumentar a velocidade média do escoamento sobre a placa, Figura 10.

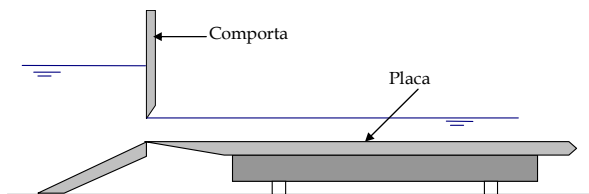


Figura 10. Esquema da comporta.

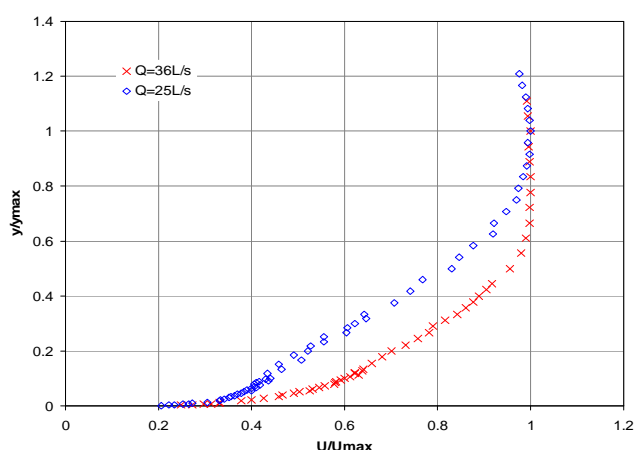
Nestas condições, foram realizados ensaios experimentais, para caudais de 36 L/s e 25 L/s, tendo-se verificado um movimento generalizado de partículas do leito para as duas condições.

Foram medidos perfis de velocidade, a partir dos quais foi possível obter os valores da velocidade de atrito e da tensão de arrastamento, através do método do logaritmo, Quadro 4, com as limitações associadas à sua aplicação em superfícies rugosas. A explicação do método do logaritmo encontra-se em Carvalho *et al.*, 2006.

Quadro 4. Condições de escoamento consideradas com instalação alterada ($d=4\text{mm}$).

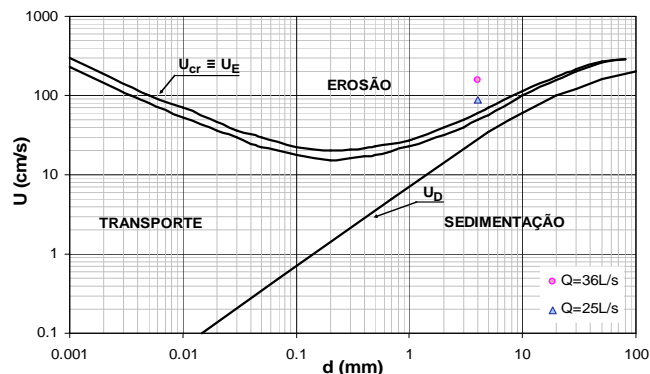
Q (L/s)	h (cm)	U (cm/s)	u^* (m/s)	τ (N/m ²)
36	5.7	157.89	0.0561	3.140
25	7.0	89.29	0.0549	3.009

É de referir que apesar de se terem obtido condições de movimento de partículas do leito, estes resultados servem apenas como referência e terão que ser analisados e aprofundados posteriormente, uma vez que na secção de estudo o escoamento ainda não se encontrava desenvolvido, tal como se pode verificar pelas diferenças encontradas nos perfis de velocidade apresentados na figura 11. Os perfis encontram-se adimensionalizados em relação à velocidade máxima e com a correspondente altura do escoamento.

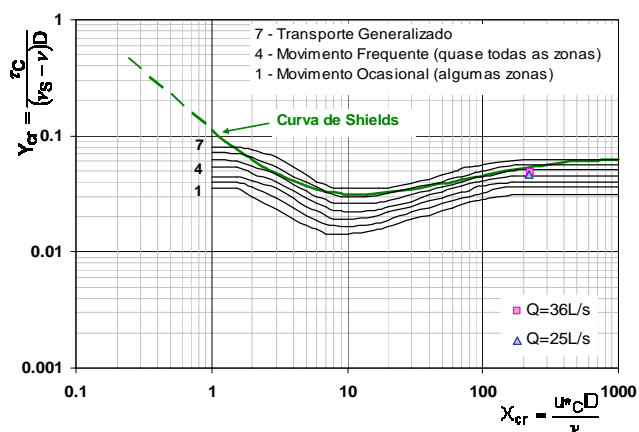
Figura 11. Perfis de velocidade medidos para $d= 4\text{mm}$ e instalação alterada.

A partir dos valores da tensão de arrastamento e da velocidade média do escoamento foi possível aplicar os critérios existentes para as duas condições. No gráfico da figura 12, correspondente ao diagrama de Hjulstrom, estão localizados os dois pontos representativos das condições testadas, com a instalação alterada.

Verifica-se que, neste caso, os pontos representativos das condições se encontram na zona de erosão, ou seja, tal como verificado experimentalmente, ocorre movimento de partículas com 4 mm de diâmetro, nestas condições. A análise da figura permite, ainda, verificar que a condição correspondente ao caudal de 25 L/s se encontra muito próxima da condição crítica de início do movimento.

Figura 12. Critério de Hjulstrom: instalação alterada ($d=4\text{ mm}$).

Na figura seguinte encontra-se representado o diagrama de Shields, bem como os pontos obtidos experimentalmente. É possível verificar que estes se encontram já muito perto da curva de Shields, correspondentes a movimento frequente.

Figura 13. Critério de Shields: instalação alterada ($d= 4\text{mm}$).

6. Conclusões

Os ensaios experimentais permitiram confirmar que, tal como previsto pela aplicação dos critérios de início de movimento, não ocorre movimento de partículas de 4mm, para as condições testadas anteriormente, nos estudos de camada limite em superfície lisa e rugosa tipo "lixa".

Foram realizados ensaios complementares, com o objectivo de aumentar as velocidades médias do escoamento. Nestas condições, verificou-se a ocorrência de movimento das partículas de 4 mm para os caudais de 36 L/s e 25 L/s, encontrando-se a última condição muito próxima da condição crítica de início de movimento.

Tal como foi referido ao longo deste trabalho, apresentaram-se os primeiros resultados obtidos, que deverão ser analisados e aprofundados, quer no que se refere ao desenvolvimento dos escoamentos obtidos após a alteração da instalação, quer em relação à determinação da tensão de arrastamento.

Nos próximos trabalhos pretende-se, à semelhança do que foi realizado nos estudos de camada limite, utilizar a sonda óptica para medição directa da tensão de arrastamento nos leitos de partículas uniformes, verificando igualmente se tal técnica de medição é aplicável nestas condições. Poderá ser uma forma de ultrapassar as dificuldades de aplicação do método do logaritmo, e permitir o desenvolvimento dos resultados aqui apresentados, estudando e caracterizando a condição crítica de início de movimento.

Referências

- Aleixo, R. (2006). *Estudos de Sedimentação e Transporte Empregando Novas Técnicas Analíticas e Experimentais*, Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Cardoso, A. H. (1998). *Hidráulica Fluvial*, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa. ISBN 927-31-0815-1.

- Carvalho, E., Maia, R. e Proença, M. F. (2006) *Fenómenos de Sedimentação e Transporte – Novas perspectivas de análise*, 1as Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente, FEUP/IHRH.
- Graf, W. H. (2001). *Fluvial Hydraulics*, John Wiley & Sons, Chichester. ISBN 0-471-97714-4.
- Hoffmans, G. J. C. M. e Verheij, H. J. (1997). *Scour Manual*, A. A. Balkema, Rotterdam, Brookfield. ISBN 90-5410-673-5.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação para a Ciência e a Tecnologia o financiamento deste trabalho por meio da bolsa de Doutoramento SFRH/BD/19575/2004.